

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学 号: 23120061152491

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

光纤布拉格光栅法布里-珀罗滤波器及其在  
可调谐窄线宽光纤激光器中应用的研究

Investigation on Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Filter and  
its Application in Tunable Narrow Linewidth Fiber Ring  
Laser

陈 敏 秀

指导教师姓名: 董 小 鹏 教授

专 业 名 称: 无 线 电 物 理

论文提交日期: 2009 年 5 月

论文答辩时间: 2009 年 5 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2009 年 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘 要

可调谐单纵模光纤激光器以其在光纤通信和传感领域的重要应用，成为光纤激光器的重要发展方向之一，也是研究的热点。为实现全光纤激光器，光纤布拉格光栅（FBG）的中心波长具有可以受温度和应力等因素调谐而且易于实现光纤激光器的全光纤化的优点，近年来被广泛应用于光纤激光器中作为波长选择和调谐元件。

因基于光纤布拉格光栅的法布里-珀罗滤波器(FBG-FP)的谐振峰具有非常窄的滤波特性，同时又具有 FBG 易于与光纤耦合的特点，近年来，有不少将 FBG-FP 用于光纤激光器中作为选模元件实现单纵模窄线宽激光的研究报道。

本文提出了将两个不同自由频谱宽度（FSR）的光纤布拉格光栅法布里-珀罗滤波器（FBG-FP）级联，并对其中一个 FBG-FP 施加应力，使其透射谱发生整体搬移。基于游标原理，实现两个 FBG-FP 滤波器透射峰的对准和窄线宽的滤波输出。本文从理论和实验两方面研究分析了基于光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔游标效应的滤波器工作原理和选模特性。

本文首先简述了光纤激光器的原理、应用及其发展现状，并对光纤布拉格光栅的工作原理、刻写方法和基本特性等作了详细的介绍。FOGS-BG 仿真软件是基于光纤光栅理论分析方法—耦合波理论与传输矩阵法来分析基于 FBG 的元件特性的工具。本文接着分析了 FOGS-BG 所需设置的模式参数，并采用 FOGS-BG 分析了 FBG-FP 的透射谱特性及其应力调谐特性；在此基础上，给出了基于两个 FBG-FP 的游标原理的仿真结果。

本文在 FBG-FP 游标原理的理论分析的指导下，实验中选择了平均自由谱宽（FSR）分别为 97.1pm 和 76.8pm 的两个 FBG-FP 接入环形腔掺铒光纤激光器中，对其中一个 FBG-FP 通过平移台移动实现应力调谐，级联后组合滤波器在腔中作为精细选模元件，抑制纵模数，与单个 FBG-FP 相比，不仅具有更好的选模特性，更容易实现单纵模运转；而且调谐激光所需的应力更小，调谐的灵敏度提高。本文采用了两种方案实现可调谐的掺铒光纤激光器，并对两种方案作了对比。

**关键词：**光纤激光器；光纤光栅；法珀滤波器；游标原理；窄线宽

## Abstract

Tunable single-longitudinal-mode fiber laser has attracted much interest due to its important applications in the fields of optical communication and sensing systems. Owing to the properties that the center wavelength of fiber Bragg grating (FBG) can be tuned by strain or temperature and that it is compatible with other optical fiber components, FBG has served as a wavelength selecting and tuning component in fiber laser.

Fiber Bragg grating Fabry-Perot filter composed of two FBGs with a specific separation combines the advantages of both FBG and FP. Therefore, on one hand, FBG-FP is compatible with optical fiber components and can be tuned by strain or temperature like FBG. On the other hand, FBG-FP has resonance peaks with very narrow linewidth like FP. In recent years, some investigations reported that single-longitudinal-mode and narrow linewidth fiber laser had been easily obtained by using FBG-FP filter as a mode selector.

The thesis proposes that two FBG-FP filters with different but close free spectrum range (FSR) can function the same as a vernier by means of tuning one of the FBG-FP by strain. The working principle and mode selecting properties of the cascaded FBG-FP filters are discussed in detail.

In this thesis, firstly, the fundamentals of both fiber laser and FBG are introduced. Fiber optical grating simulator for Bragg grating (FOGS-BG) analyzes FBG-based components based on transfer matrix method. The modal parameters for simulation are discussed and the characteristics of FBG-FP are investigated utilizing FOGS-BG. Then the simulation results of vernier principle based on two FBG-FP filters are also given.

Under the guidance of previous theoretical analysis of vernier principle, two FBG-FP filters with respective average FSR of 97.1 pm and 76.8 pm were inserted in the ring cavity for fine mode selection in experiment. The number of cavity modes is tremendously suppressed and it is easier to obtain single-longitudinal-mode

operation and narrow linewidth laser. In the mean time, compared with single FBG-FP, the cascaded FBG-FP filters requires a smaller tuning and the tuning is quite efficient. Two configurations are proposed in the thesis and the comparison between them is discussed, too.

**Keywords:** Fiber laser; Fiber Bragg grating; Fabry-Perot filter; Vernier principle; Narrow linewidth.

# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	IV
Contents.....	VI
Acknowledgement 76 .....	错误！未定义书签。
第一章 绪论 .....	1
1.1 光纤激光器的发展及应用简介.....	1
1.2 光纤激光器的基本原理.....	2
1.3 光纤激光器结构及单纵模实现.....	5
1.4 光纤激光器的特点.....	7
1.5 可调谐光纤激光器.....	8
1.6 本文的主要工作及创新点.....	10
第二章 光纤光栅的基本原理与分析.....	12
2.1 光纤光栅的形成原理和刻写方法.....	12
2.2 光纤光栅的分类.....	14
2.3 光纤 Bragg 光栅的工作原理.....	16
2.4 光纤 Bragg 光栅基本特性.....	21
2.5 本章小结.....	23
第三章 采用光纤布拉格光栅的法布里-珀罗腔特性仿真与分析..	24
3.1 法布里-珀罗腔基本原理.....	24
3.2 采用光纤 Bragg 光栅的 FP 腔 (FBG-FP).....	26
3.3 普通 FP 与 FBG-FP 的联系与区别.....	28
3.4 FP 的游标原理 .....	30
3.5 光纤光栅法布里-珀罗腔特性的仿真与分析.....	32
3.5.1 光纤布拉格光栅仿真软件 FOGS-BG 简介 .....	32
3.5.2 FOGS-BG 软件相关参数的设置与分析.....	32
3.5.3 采用 FOGS-BG 仿真 FBG-FP.....	37
3.5.4 应力调谐理论仿真.....	38
3.5.5 游标原理的仿真.....	39
3.6 本章小结.....	45
第四章 实验测量与结果 .....	46
4.1 实验所用 FBG-FP 的制作工艺和参数.....	46



4.2 FBG-FP 应力调谐的实验与分析 .....	48
4.3 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的可调谐光纤激光器 .....	52
4.3.1 环形可调光纤激光方案一 .....	52
4.3.2 环形可调光纤激光方案二 .....	58
4.3.3 两种方案的比较 .....	64
4.4 对在两个 FBG-FP 滤波器间不加隔离器的分析与讨论 .....	64
4.5 FBG-FP 的选模特性分析 .....	66
4.6 本章小结 .....	68
第五章 总结与展望 .....	69
参考文献 .....	71
致 谢 .....	76
附 录 .....	77

## Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English.....	II
Contents in Chinese .....	IV
Contents in English.....	VI
Chapter 1 Preface.....	1
1.1 Development and applications of fiber laser technology.....	1
1.2 Basic Principle of fiber laser.....	2
1.3 Cavity structures and realization of single-longitudinal mode.....	5
1.4 Advantages of fiber laser.....	7
1.5 Rescent investigations on Tunable fiber laser.....	8
1.6 Main work and innovation of the thesis.....	10
Chapter 2 Fiber Bragg grating fundamentals.....	12
2.1 Fabricating principle and methods of FBG.....	12
2.2 Category of Fiber Bragg grating.....	14
2.3 Working principle of FBG.....	16
2.4 Basic properties of FBG.....	21
2.5 Summary.....	23
Chapter 3 Discussion of FBG_based Fabry-Perot filter....	24
3.1 Basic principle of Fabry-Perot filter.....	24
3.2 FBG-FP filter.....	26
3.3 Connection and difference between conventional FP and FBG-FP.....	28
3.4 Principle of matching the transmission spectra of two FBG-FP.....	30
3.5 simulation and analysis of the properties of FBG-FP.....	32
3.5.1 Introduction of fiber optical grating simulator for Bragg grating—FOGS-BG.....	32
3.5.2 Analysis of FOGS-BG modal parameters.....	32
3.5.3 Simulation using FOGS-BG.....	37
3.5.4 Simulation of strain tuning.....	38
3.5.5 Simulation of vernier principle.....	39
3.6 Summary.....	45
Chapter 4 Experimental configurations and results.....	46
4.1 Fabrication and properties of experimental FBG-FP filters... ..	46
4.2 Strain tuning setup for tunable FBG-FP filter.....	48

<b>4.3 Tunable fiber laser based on matching the transmission spectra of two FBG-FP filters.....</b>	<b>52</b>
4.3.1 Configuration of tunable ring fiber laser.....	52
4.3.2 Alternative configuration.....	58
4.3.3 Comparison between two configuration.....	64
<b>4.4 Discussion of the cascaded FBG-FP filters without an isolator between them.....</b>	<b>64</b>
<b>4.5 Mode selecting features of FBG-FP cascaded filters.....</b>	<b>66</b>
<b>4.6 Summary.....</b>	<b>68</b>
<b>Chapter 5 Conclusion and Prospect.....</b>	<b>69</b>
<b>Reference.....</b>	<b>71</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>76</b>
<b>Appendix.....</b>	<b>77</b>

厦门大学博硕士论文摘要库

## 第一章 绪论

### 1.1 光纤激光器的发展及应用简介

早在 1917 年, 爱因斯坦在光量子假设基础上, 从理论上预言了存在受激辐射光的可能性。1928 年, 德国的 R.Ladenburg 和 H.Kopferman 用气体放电实验证明了受激辐射假设成立。到 20 世纪 50 年代, 首次实验发现核自旋系统的粒子数反转现象, 并提出受激辐射放大理论, 由这个理论所预见的粒子数反转体系对入射电磁场产生受激放大作用的可能性, 首先在无线电电子学的微波技术领域内得以实现。1954 年,  $\text{NH}_3$  分子气体微波量子放大器(Maser)诞生。微波量子放大器技术的出现和进展, 促进人们在光频波段的探索。1958 年, A.L.Schawlow 等人提出将 Maser 原理推广到光波段, 继而许多人提出了各种激光器建议。1960 年, 第一台红宝石激光器由美国人 T.H.Maiman 研制成功。至此, 激光技术就以科学史上罕见的高速度向前发展着, 激光理论和激光应用也很快开拓。

在外界通过光、热、电、化学或核能等各种方式的激励下, 谐振腔内的激活介质将会在两个能级之间实现粒子数反转, 这时产生受激辐射, 在产生的受激辐射光中, 沿轴向传播的光在两个反射镜之间来回反射、往复通过已实现了粒子数反转的激活介质, 不断引起新的受激辐射, 使轴向行进的该频率的光得到放大, 这个过程称为光振荡。这是一种雪崩式的放大过程, 使谐振腔内沿轴向的光骤然增强, 所以辐射场能量密度大大增强, 受激辐射远远超过自发辐射, 这种受激的辐射光从部分反射镜输出, 它就是激光。

激光器的种类越来越多。按工作介质分, 激光器可分为气体激光器、固体激光器、半导体激光器和染料激光器四大类, 后来还发展了准分子、自由电子激光器等。

光纤激光器是近年来发展起来的一种新型激光器件, 也是目前国内外光电信息领域研究的热点技术之一。因在光学模式、使用寿命等方面的优点, 光纤激光器已成为新一代固体激光器的代表, 在国内外得到了广泛研究和迅速发展, 有着广阔的发展前景<sup>[1]</sup>。

早在 1961 年, 美国光学公司(American Optical Company)的 E.Snitzer<sup>[2]</sup> 等

人就在掺钕( $\text{Nd}^{3+}$ )玻璃包层波导中发现激光辐射,从而开创了光纤激光器领域的研究。1964 年<sup>[3]</sup>,他们又发表了多组分玻璃光纤中的光放大结果,从而提出了光纤激光器和光纤放大器的概念。不久以后,光纤激光器被用于光学信息处理方面的工作,但由于当时条件的限制,此后光纤激光器的发展基本停滞不前。

1966 年<sup>[4]</sup>,高锟和 Hockham 首先讨论了利用光纤作为通讯介质的可能性,此后光纤在通信领域得到较快发展。由于光通信的迅猛发展,光纤制造工艺与半导体激光器生产技术日趋成熟,基于石英光纤的定向耦合器这样的重要器件也成功制作,这一切为光纤激光器和放大器的发展奠定了坚实的基础。

20 世纪 80 年代中期,世界各地的许多研究组开始进行光纤激光器的研究。从此,光纤激光器取得了长足的发展。1985 年,英国南安普敦(Southampton)大学的研究组取得突破,S.B.Poole<sup>[5]</sup>等人用化学气相沉积(MCVD)方法制成了低损耗的掺铒单模光纤,从而为光纤激光器带来了新的前景。1987 年<sup>[6]</sup>,英国通信研究实验室(BTRL)报道了其在增益和激发态吸收等研究领域作了大量的工作,最重要的是制成了利用半导体激光器作为泵浦源的光纤激光器。此后又出现了光纤激光器的调 Q、锁模、单纵模输出等研究工作。

目前国内外关于光纤激光器的研究方向和热点主要集中在高功率光纤激光器、高功率光子晶体光纤激光器、窄线宽可调谐光纤激光器、多波长光纤激光器、超短脉冲光纤激光器、拉曼光纤激光器等几个方面。因此它在通信、军事、医疗和光信息处理等领域都将有广阔的应用前景,特别是在光通信领域,随着光波分复用技术的发展,光纤激光器将能很好地满足通信系统对光源的更高要求。

## 1.2 光纤激光器的基本原理

与普通的激光器一样,光纤激光器也是由泵浦源、增益介质和谐振腔组成,如图 1.1 所示。

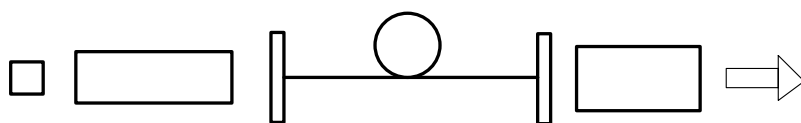


图 1.1 光纤激光器基本结构示意图

一般的光纤激光器大多是在光纤放大器的基础上发展起来的。它的增益介质为掺杂稀土元素的光纤，泵浦光通过光纤时，纤芯中的稀土离子吸收泵浦光，跃迁到激光上能级，产生粒子数反转。反转后的粒子在自发辐射光子或者特别注入的光子诱导下以受激辐射跃迁到激光下能级，同时发射出与诱导光子相同的光子，再加上一个恰当的反馈机制，用来增强输出激光的强度，调节和选择激光的波长和方向，便形成了光纤激光器<sup>[7]</sup>。

依据掺杂离子（如  $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  等）特性的不同，工作物质吸收不同波长泵浦光而激射出特定波长的激光。选择在光纤中掺稀土离子构成光纤激光器，部分原因就是稀土离子的吸收范围正好与半导体激光器的辐射范围重合，因而能方便地采用成本低廉的、工艺较为成熟的半导体激光器作为泵浦光源。掺铒光纤在 1550nm 波长处具有很高的增益，正处在光纤通信的最低损耗窗口，且性能优良，因此受到广泛重视，发展也最为迅速。

### 1. $\text{Er}^{3+}$ 的能级结构

掺铒光纤中的  $\text{Er}^{3+}$  离子所处的能量状态是不能连续取值的，它只能处在一系列分立的能量状态上，这些能量状态称为能级。铒离子基态为  $^4\text{I}_{15/2}$ ，第一、二激发态分别为  $^4\text{I}_{13/2}$  和  $^4\text{I}_{11/2}$ 。第二态的寿命很短，仅有  $7\mu\text{s}$  左右，第一激发态是一个亚稳态，寿命长达 10 ms，因此， $^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{I}_{13/2}$  和  $^4\text{I}_{11/2}$  构成了一个很好的三能级系统，如图 1.2 所示，分别对应为基态、亚稳态、激发态。激发态与基态之间的能量差与泵浦光子能量相同，亚稳态与基态之间的能量差与 1550nm 的光子能量相同。当在掺铒光纤中传输的光子能量与  $\text{Er}^{3+}$  离子的某两个能级之间的能量差相等时， $\text{Er}^{3+}$  离子就会与光子发生相互作用，产生受激辐射和受激吸收效应。受激辐射是指  $\text{Er}^{3+}$  离子与光子相互作用从高能级跃迁到低能级，发射出一个与激发光子完全相同的光子（即光子的频率、相位、传播方向、偏振态相同）；受激辐射是指  $\text{Er}^{3+}$  离子与光子相互作用从低能级跃迁到高能级，并

且吸收激发光子。

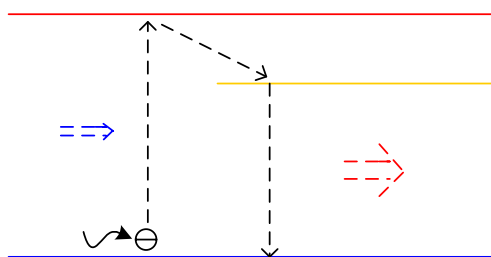


图 1.2 铒离子能级简图

$E3(^4I_{11/2})$

## 2. 掺铒光纤激光器泵浦源的选择

$Er^{3+}$  离子在 800nm、980nm 和 1480nm 处有吸收带存在,因此波长为 800nm、980nm 和 1480nm 的激光器均可做掺铒光纤激光器的泵浦源。

采用 800nm 波段泵浦时,在该波段上存在着泵浦光的激发态吸收 (ESA),把已经位于激光上能级的  $Er^{3+}$  离子抽运到了更高的能级,虽然  $Er^{3+}$  又很快从高能级跃迁到激光上能级,对上能级的粒子数没有太大影响,但严重浪费泵浦,降低了效率,所以不是最佳泵浦选择。

980nm 泵浦系统为三能级系统,不存在 ESA 效应,泵浦效率高,增益系数最高,比 1480nm 高约 2~3dB。1480nm 波段泵浦属于二能级系统,不存在泵浦光的 ESA,但是 1480nm 波段的泵浦光也会引起受激辐射,浪费了上能级的粒子数,降低了泵浦效率,同时又产生噪声,降低激光质量。 $Er^{3+}$  从上能级到下能级的自发辐射总是存在的,当泵浦光达到一定强度时,这种放大的自发辐射将大大加强,形成“超荧光”。超荧光是介于激光与荧光之间的一种状态,是放大的自发辐射 (ASE)。若泵浦功率很强,掺  $Er^{3+}$  光纤中的辐射放大增益将完全抵消系统的损耗,从而形成自激振荡产生激光。

因此,波长 980nm 的泵浦光以其泵浦效率高、噪声系数低,不存在 ESA 效应等优点成为掺铒光纤激光器的泵浦源的最佳选择。

## 3. 掺铒光纤放大原理

在掺铒光纤中注入足够强的泵浦光,就可以将大部分处于基态的  $Er^{3+}$  离子抽运到激发态上,处于激发态的  $Er^{3+}$  离子又迅速无辐射地转移到亚稳态上。由于  $Er^{3+}$  离子在亚稳态上能级寿命较长,因此,很容易在亚稳态与基态之间形成

电子  
吸收  
泵浦  
光跃  
迁



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库